

References (transliterated)

1. IEC 61000-4-9, Ed. 2.0: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-9: Testing and measurement techniques – Immunity magnetic field immunity test. IEC, 2016. 114 p.
2. MIL-STD-461G:2015 Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. 280 p.
3. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svyazi k ionizirujushhim i jelektromagnitnym izlucheniham [Ensuring the durability of communication equipment to ionizing and electromagnetic radiation]. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 296 p.
4. Kravchenko V.I. Grozozaschita radioelektronnyh sredstv: Spravochnik [Lightning protection of radio electronic means: Directory] Moscow: Radio and communications Publ., 1991. 264 p.
5. Petkov A.A. Formiruyushchiye vozmozhnosti generatora impul'sov magnitnogo polya [Formative capabilities of the magnetic field pulse generator] Elektrotehnika i Elektromekhanika. 2015. № 2. P. 68-71.
6. Kravchenko V.I., Koliushko G.M., Petkov A.A. Interconnection structure of high impulse device and forms generated pulses. Fizika impulsnyh razryadov v kondensirovannyh sredah : mezhdunar. nauch. konf., 17-21 avgusta 2009 g. : tezisy dokl. [Physics of pulsed discharges in condensed media: Intern. scientific. Conf., 17-21 August 2009: Abstracts]. Nikolaev: 2009. P. 119-120.
7. DSTU 2526-94. Compatibility of electromagnetic means. Resistance to impulse magnetic field. Technical requirements and test methods [Compatibility of electromagnetic means. Resistance to impulse magnetic field. Technical requirements and test methods]: Gosstandart of Ukraine. Kyiv: 1994. 26 p.
8. DSTU 2525-94. Sumisnist' tekhnichnykh zasobiv elektromagnitna. Stiykist' do zahasayuchoho zminnoho mahnitnoho polya. Tekhnichni vymohy ta metody vyprobuvan' [Compatibility of electromagnetic means. Resistance to damping alternating magnetic field. Technical requirements and test methods] : Derzhstandart Ukrayiny. Kyiv: 1994. 28 p.
9. Petkov A.A. Generirovanie ispytatelnyh impulsiv magnitnogo polya [The generation of test pulses of magnetic field]. Visnik NTU «KhPI». Seriya: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage.] Kharkiv: NTU "KhPI". No.37. P. 73-78.
10. Razevig V.D. Skhemotekhnicheskoye modelirovaniye s pomoshch'yu Micro-Cap 7 [Circuit simulation using Micro-Cap 7]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2003. 368 p.
11. Kottingkhem M. Excel 2000: rukovodstvo razrabotchika [Excel 2000: Developer's Guide] : per. s angl. Kyiv: Izdatel'skaya gruppa BVH, 2000. 704 p.
12. Kravchenko V.I., Petkov A.A. Parametric synthesis of high-voltage pulse test device with a capacitive energy storage. Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2007. No.6. P. 70-75.

Поступила (received) 31.10.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Марценюк Валентина Євгенівна (Марценюк Валентина Евгеньевна, Martseniuk Valentyna) – НТУ «ХПІ», старший викладач кафедри інженерної електрофізики; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3842-4282>; e-mail: v.e.martseniuk@gmail.com

Петков Олександр Олександрович (Петков Александр Александрович, Petkov Alexander Alexandrovich) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, НТУ «ХПІ», професор кафедри інженерної електрофізики; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0101-0089>; e-mail: alexpetkov2014@gmail.com

УДК 621.314

А.С. МАСЛІЙ, Н.П. КАРПЕНКО, О.Г. ТУРЕНКО, О.Е. САФРОНОВ, П.А. ГОЛОВКО**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ
ДЛЯ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗУ**

Дана стаття присвячена дослідженню відносно нового типу електродвигуна: вентильно-індукторного на маневровому тепловозі. Даний двигун відноситься до класу синхронних реактивних машин з вентильним керуванням. На основі рівнянь Лагранжа була описана математична модель даного електромеханічного перетворювача, а також проводився комплекс цифрових експериментів з метою визначення залежностей між потокозчепленням фаз двигуна і їх похідними. За результатами аналізу магнітного поля методом кінцевих елементів були визначені значення потокозчеплення фаз вентильно-індукторного двигуна і значення електромагнітного моменту. За допомогою програмного середовища FEMM були отримані тривимірні поверхні, що показують залежність потокозчеплення фази та електромагнітного моменту від магніторушійної сили та кута повороту ротора, які в подальшому використані в імітаційній моделі вентильно-індукторного двигуна в середовищі Matlab. Проведено ідентифікацію параметрів двигуна ДВІ-165 та отримано його математичну модель на основі рівнянь Лагранжа II роду. У результаті моделювання отримані осцилограми прямого пуску, а саме моменту, струму та швидкості з обмеженням струму на рівні 600А.

Ключові слова: вентильно-індукторний двигун; електромеханічний перетворювач; маневровий тепловоз; імітаційна модель; метод кінцевих елементів; електронний комутатор.

А.С. МАСЛИЙ, Н.П. КАРПЕНКО, А.Г. ТУРЕНКО, О.Э. САФРОНОВ, П.А. ГОЛОВКО

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ПРИВОДА ДЛЯ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА

Данная статья посвящена исследованию относительно нового типа электродвигателя: вентильно-индукторного на маневровом тепловозе. Данный двигатель относится к классу синхронных реактивных машин с вентильным управлением. На основе уравнений Лагранжа была описана математическая модель данного электрохимического преобразователя, а также проводился комплекс цифровых экспериментов с целью определения зависимостей между потокоцеплением фаз двигателя и их производными. По результатам анализа магнитного поля методом конечных элементов были определены значения потокоцепления фаз вентильно-индукторного двигателя и значение электромагнитного момента. С помощью программной среды FEMM были получены трехмерные поверхности, показывающие зависимость потокоцепления фазы и электромагнитного момента от магнитодвижущей силы и угла поворота ротора, которые в дальнейшем использованы в имитационной модели вентильно-индукторного двигателя в среде Matlab. Проведена идентификация параметров двигателя ДВИ-165 и получено его математическую модель на основе уравнений Лагранжа второго рода. В результате моделирования получены осциллограммы прямого пуска, а именно момента, тока и скорости с ограничением тока на уровне 600А.

Ключевые слова: вентильно-индукторный двигатель, электрохимический преобразователь; маневровый тепловоз; имитационная модель; метод конечных элементов; электронный коммутатор.

A. MASLIY, N. KARPENKO, O. TURENKO, O. SAFRONOV, P. GOLOVKO

MATHEMATICAL MODELING OF SWITCHED-RELUCTANCE ELECTRIC DRIVE FOR MANEUVERING DIESEL LOCOMOTIVE

This article is devoted to the study of a relatively new type of electric motor: a switched-reluctance motor on a maneuvering diesel locomotive. This engine belongs to the class of synchronous jet machines with valve control. On the basis of the Lagrange equations, a mathematical model of the electromechanical converter was described, and a set of digital experiments was conducted to determine the relationships between the coupling of the motor phases and their derivatives. According to the results of the magnetic field analysis, the values of the coupling of the phases of the valve-inductor motor and the values of the electromagnetic torque were determined by the finite element method. Three-dimensional surfaces were obtained using the FEMM software environment, showing the dependence of the phase and electromagnetic torque coupling on the magnetomotive force and the rotation angle of the rotor, which were subsequently used in a simulation model of a valve-inductor motor in the Matlab environment. The parameters of the engine DVI-165 are identified and its mathematical model is obtained based on Lagrange equations of the second kind. The simulation results in direct-start waveforms, namely, torque, current, and speed with 600A current limiting.

Keywords: switched-reluctance motor; electromechanical converter; maneuvering diesel locomotive; simulation model; finite element method; electronic switch.

Вступ. З розвитком напівпровідникової електроніки все більш широкого застосування знаходять вентильно-індукторні двигуни (ВІД). ВІД відноситься до класу синхронних реактивних машин з вентильним керуванням. ВІД представляє собою сукупність електромеханічного перетворювача енергії – індукторної машини (рис. 1) і електронного блоку керування. Необхідними частинами блоку керування є:

- блок керування (БК) комутацією, що містить алгоритм і систему керування електронним комутатором;
- датчики положення ротора (ДПР) і струму фази, які можуть виконуватися інтегрованими із блоком керування;
- електронний комутатор (ЕК), що забезпечує підключення обмоток індукторної машини до джерела живлення.

Принцип дії ВІД базується на реактивній взаємодії зубців статора й ротора. Зубці ротора, під дією струму, що протікає в котушках фази, намагаються зайняти положення, що відповідає найбільшому значенню енергії магнітного поля, що відповідає режиму двигуна [1-5].

В якості електромеханічного перетворювача енергії був обраний чотирифазний ВІД, який має конфігурацію 8/6 та представлений на рис. 2, а технічні характеристики зведені до табл. 1.

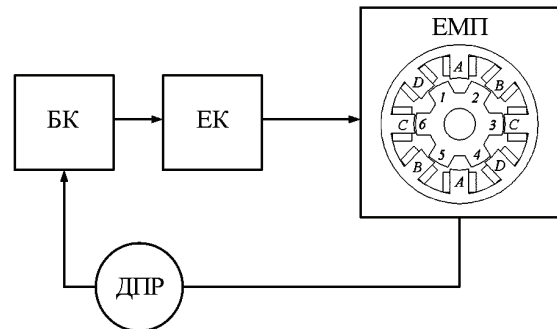


Рисунок 1 – Функціональна схема ВІД

Таблиця 1 – Технічні характеристики двигуна ДВИ-165

Електромеханічні параметри	
U_H , В	200
I_H , А	850
M_H , Нм	875,5
n_H , об/хв	1800
R_{Φ} , Ом	0,135
L_d , мГн	1,72
L_q , мГн	0,36

Метою даної роботи є розрахунок магнітного поля ВІД та побудова основних залежностей його роботи для подальшого використання в імітаційній моделі роботи ВІД.

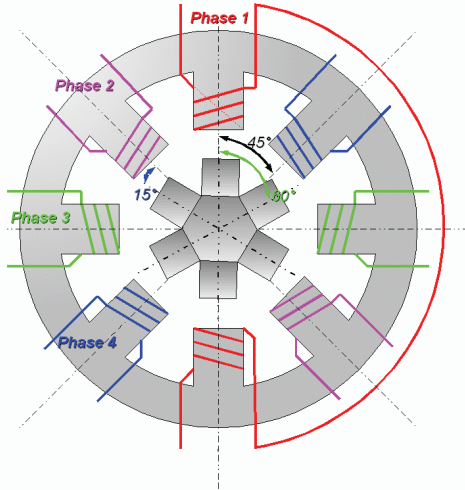


Рисунок 2 – Чотирифазний ВІД конфігурації 8/6

Постановка задачі. Для математичного опису такого ЕМП використовуємо систему диференціальних рівнянь на основі рівнянь Лагранжа:

$$\begin{cases} \frac{di_A}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_A(i_A, \theta)}{\partial i_A}} \left(e_A - r_A i_A - \frac{\partial \Psi_A(i_A, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right); \\ \frac{di_B}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_B(i_B, \theta)}{\partial i_B}} \left(e_B - r_B i_B - \frac{\partial \Psi_B(i_B, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right); \\ \frac{di_C}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_C(i_C, \theta)}{\partial i_C}} \left(e_C - r_C i_C - \frac{\partial \Psi_C(i_C, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right); \\ \frac{di_D}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_D(i_D, \theta)}{\partial i_D}} \left(e_D - r_D i_D - \frac{\partial \Psi_D(i_D, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right); \\ M_{\partial\theta} = f(i_A, i_B, i_C, i_D, \theta); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{\partial\theta} - M_c}{J}; \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega, \end{cases} \quad (1)$$

де i_A, i_B, i_C, i_D – струми відповідних фаз статора;
 $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_D$ – потокозчеплення відповідних фаз;

e_A, e_B, e_C, e_D – напруга джерел живлення;

θ – кут повороту ротора;

ω – кутова швидкість;

$M_{\partial\theta}$ – рушійний момент;

M_c – момент опору;

J – момент інерції ротора.

Система рівнянь (1) представляє собою математичну модель ВІД. Для ідентифікації її параметрів необхідно встановити залежності між потокозчепленням фаз ($\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_D$), а також їх похідними ($\frac{\partial \Psi(i, \theta)}{\partial i}, \frac{\partial \Psi(i, \theta)}{\partial \theta}$),

з одного боку і узагальненими координатами – з іншого. З метою визначення цих залежностей проводився комплекс цифрових експериментів. Для визначення значення потокозчеплення пропонується здійснювати розраху-

нок магнітного поля з використанням методу кінцевих елементів для плоскопаралельного завдання. За результатами аналізу магнітного поля можна визначити значення потокозчеплення фаз ВІД і значення електромагнітного моменту.

Для стаціонарного магнітного поля метод кінцевих елементів в двовірній розрахунковій моделі і прямокутній системі координат полягає в мінімізації нелінійного енергетичного функціонала. Для вирішення поставленого завдання використовувався програмний комплекс FEMM, що дозволяє розрахувати стаціонарні плоскопаралельні магнітні поля. За результатами розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів можна визначити потокозчеплення обмоток, а також величину електромагнітного моменту.

$$\Psi_A = l_\delta \sum_K w_{AK} (A_{n,A} - A_{l,A}); \quad (2)$$

$$\Psi_B = l_\delta \sum_K w_{BK} (A_{n,B} - A_{l,B}); \quad (3)$$

$$\Psi_C = l_\delta \sum_K w_{CK} (A_{n,C} - A_{l,C}); \quad (4)$$

$$\Psi_D = l_\delta \sum_K w_{DK} (A_{n,D} - A_{l,D}), \quad (5)$$

де l_δ – довжина статора;

$A_{n,A}, A_{n,B}, A_{n,C}, A_{n,D}$ – потенціали у провідниках однієї секції фази А, В, С, D;

k – кількість секцій фази;

w_K – кількість витків секції.

$$\vec{M} = \frac{1}{2} l_r \sum_{l_r} \left(\left(\vec{H} \times (\vec{B} \times \vec{n}) + \vec{B} \times (\vec{H} \times \vec{n}) \right) \times \vec{r} \right), \quad (6)$$

де l_r – контур інтегрування.

Таким чином, вирази (2) – (5) і (6) являють собою потокозчеплення і електромагнітний момент як функцію двох змінних (струму фази, а також кутової координати ротора), які можуть бути визначені шляхом розрахунку магнітного поля машини на кожному кроці інтегрування.

У постпроцесорі FEMM для розрахункової моделі ВІД задаємося збуджуючим впливом шляхом завдання величини струму котушки, намотаної на зубець статора. Також приймаємо, що котушка має один виток. У кожній замкнутій області машини задаємо матеріал і провідність даної ділянки машини. Криві намагнічування матеріалу зубців статора і ротора взяті з довідкової літератури. При розрахунках прийнято, що використовується електротехнічна сталь марки 2411.

Розподіл магнітних ліній в розрахунковій схемі ВІД під час узгодженого і неузгодженого положень при включеній фазі А представлені на рис. 3 та 4.

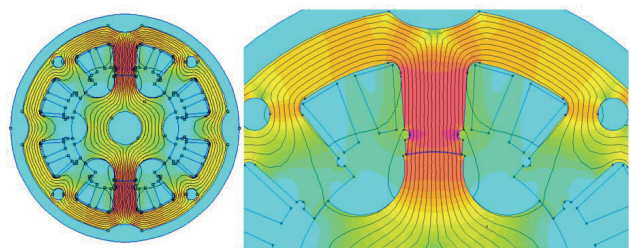


Рисунок 3 – Розподіл магнітного поля у зубцях ВІД при узгодженому положенні

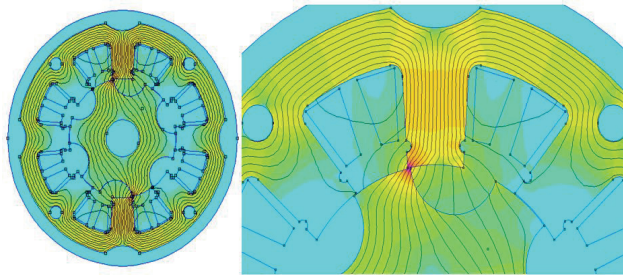


Рисунок 4 – Розподіл магнітного поля у зубцях ВІД при розузгодженому положенні

За допомогою підпрограми, написаної в текстовому файлі на мові Lua автоматизуємо процес розрахунку. Граничними областями при цьому є положення зубців статора і ротора – від неузгодженого до узгодженого положень, що складає $22,5^\circ$, а також допустимих значень МРС на рівні 40000А.

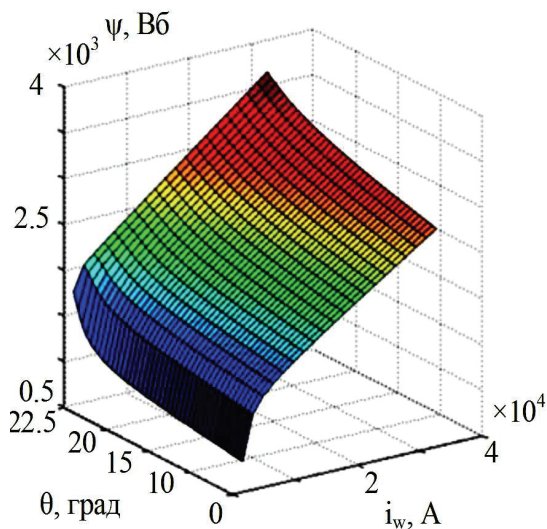


Рисунок 5 – Залежність потокозчеплення фази від МРС та кута повороту ротора

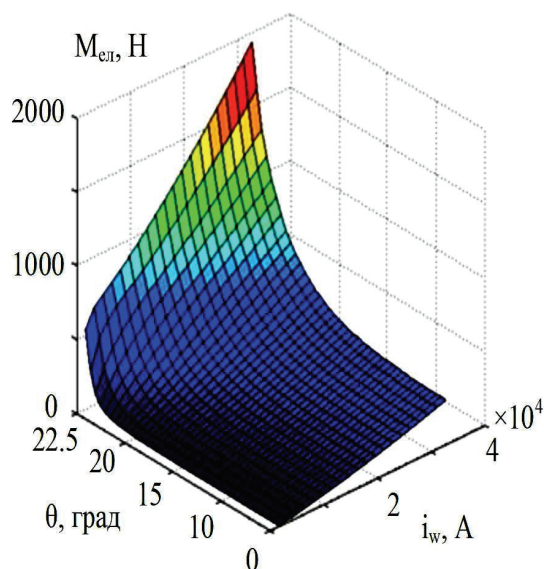


Рисунок 6 – Залежність електромагнітного моменту від МРС та кута повороту ротора

Результатом розрахунку є тривимірні поверхні, що показують залежність потокозчеплення фази та електромагнітного моменту від МРС та кута повороту ротора (рис. 5, 6).

Для отримання безперервних залежностей потокозчеплення результати цифрового моделювання пропонується апроксимувати безперервними функціями. При виборі типу функції вирішувалися наступні завдання:

- функція і її похідні по куту повороту ротора на початку і кінці інтервалу на якому проводиться апроксимація (полюсний розподіл ВІД) повинні бути однаковими;

- запропонована функція повинна враховувати зміни струмів не тільки власної, а й сусідніх фаз;

- запропонована функція повинна мати досить простий вигляд аналітичних частинних похідних по всіх координатах.

Для визначення коефіцієнтів полінома пропонується використовувати метод на основі поліномів Чебишева.

Зниження порядку математичної моделі без обмеження можливо отримати, якщо визначати момент за результатами розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів за допомогою програми FEMM.

Використовуючи раніш отриману систему рівнянь (1), складаємо структурну схему чотирифазного ВІД, що наведена на рис. 7.

Невід'ємною складовою вентиляно-індукторного приводу (ВІП) є ЕК. ЕК у ВІП необхідний для підключення фаз двигуна до джерела живлення в залежності від сигналу датчика положення ротора. Так як робота ВІД не залежить від напрямку струму в фазі, то для комутації струму в ній зазвичай застосовується півмостова (одноразовна) схема. При цьому на кожну фазу необхідно два ключа і два зворотних діода. Таким чином, число силових елементів зростає пропорційно числу фаз. Для живлення чотирифазного ВІД схема ЕК представлена на рис. 8.

При моделюванні ЕК були використані технічні характеристики IGBT-транзистора MIO1800-17E10 та діода D143-1000-18-UXJ2. Їх моделювання зводиться до опису двох стійких станів: відкритого і закритого. У відкритому стані транзистор знаходиться в режимі насичення і характеризується активним опором прямого каналу. Закритий стан транзистора характеризується нескінченно великим опором каналу. У відкритому стані діод має падіння напруги на рівні 0,8-1,2В, а в закритому стані опір діода приймається рівним нескінченності. За допомогою ЕК реалізована одиночна симетрична комутація фаз з обмеженням струму на рівні 600А.

Використовуючи структуру (рис. 7), а також запропоновану схему ЕК було створено імітаційну модель у середовищі Matlab. У результаті моделювання отримані осцилограми прямого пуску, а саме струму двигуна (рис. 9), моменту (рис. 10), швидкості (рис. 11) з обмеженням струму на рівні 600 А.

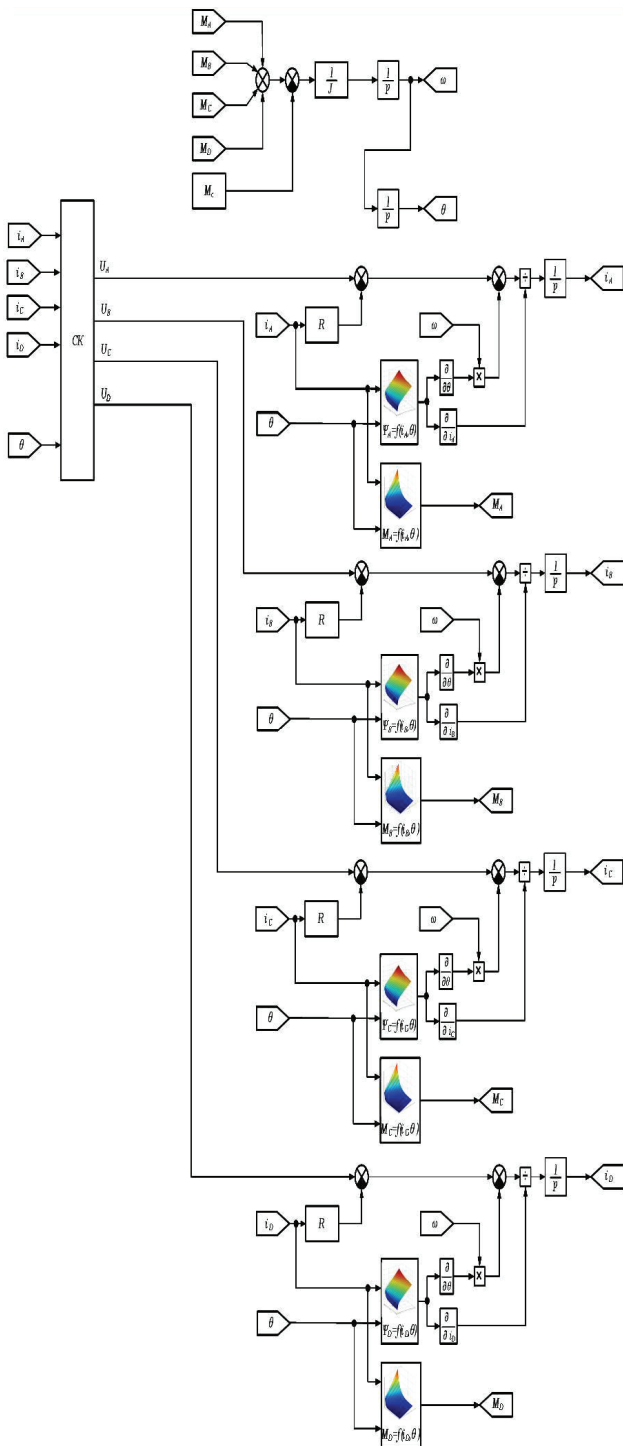


Рисунок 7 – Структурна схема ВІД

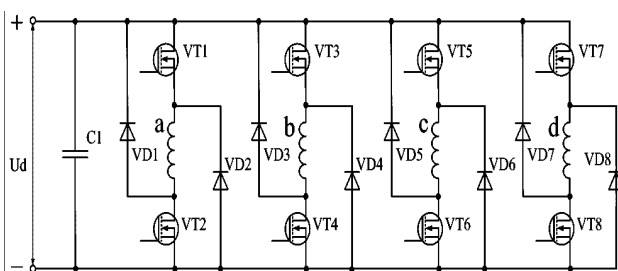


Рисунок 8 – Схема ЕК для 4-фазного ВІД

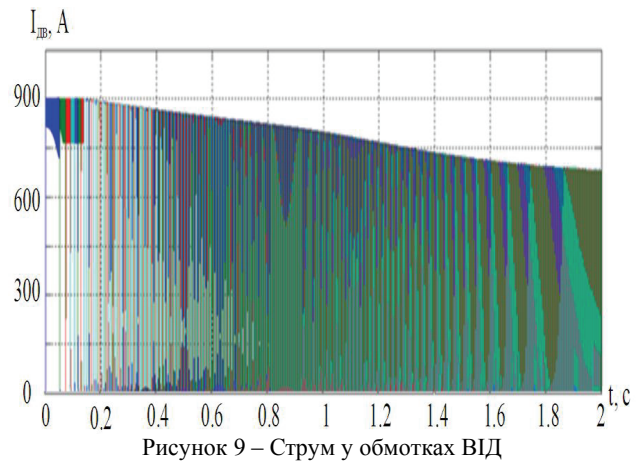


Рисунок 9 – Струм у обмотках ВІД

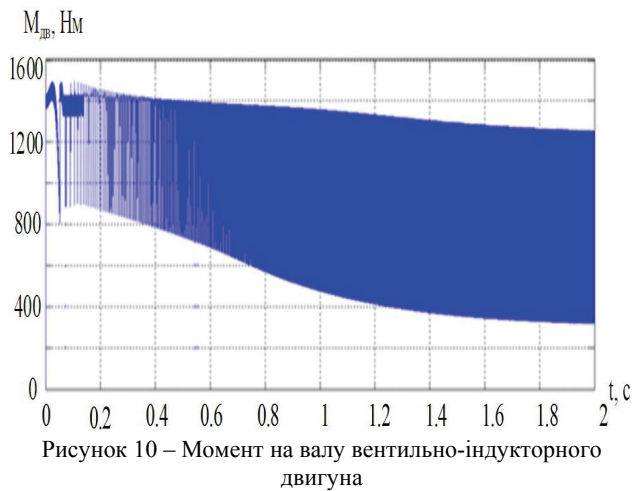


Рисунок 10 – Момент на валу вентильно-індукторного двигуна

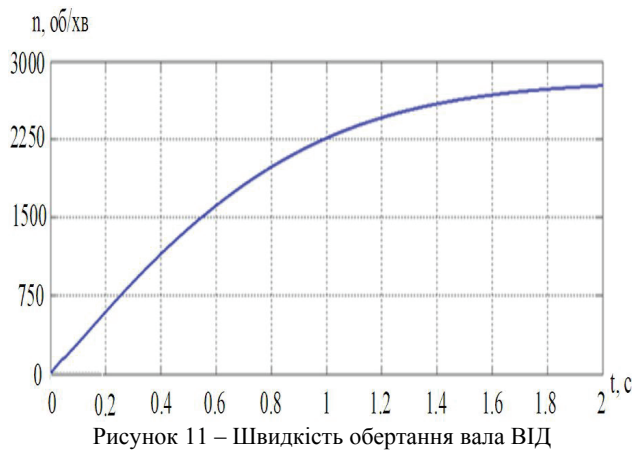


Рисунок 11 – Швидкість обертання вала ВІД

Висновки. Отримано результати у вигляді розподілу магнітного поля у двигуні, тривимірні графіки залежності потокозчеплення та електромагнітного моменту двигуна від кута повороту ротора. Дана математична модель є базовою для подальшого дослідження роботи ВІД та його застосування на маневровому тепловозі.

Список літератури

1. Krishnan R. Switched reluctance motor drives. Modeling. Simulation, Analysis, Design and Applications. CRC Press, 2001. 398 p.
2. Buriakovskiy S., Maslii A., Pasko O., Denys I. Research

and development of an electric traction drive based on a switched reluctance motor. *Transport Problems*. 2018. № 13/2. P. 69-80.

3. Viorel I.A., Strete L., Husain I. An analytical model of switched reluctance motor based on magnetic field analysis results. *Proc. of 3rd Int. Symp. on Electrical Engineering and Energy Converters*. Romania, 2009. P. 97-100.

4. Martin MANA: Mathematical model switched reluctance motor. Dept. of Power Electrical and Electronic Engineering. 2010. P. 25.

5. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. Санкт-Петербург: Издательство центрального научно-исследовательского института «Электроприбор», 2003. С. 147.

6. Rasmussen P. Omand Design and Advanced Control of Switched Reluctance Motors. Denmark: Aalborg University, 2002. 256 p.

7. David M. Finite Element Method Magnetics. User's Manual. 2004. Version 3.4. 79 p.

8. Рышша В.В. Моделирование и синтез реактивных и индукторных электрохимических преобразователей: дис. д-ра техн. наук: 05.09.01 / Одесса, 2004. 336 с.

9. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. Санкт-Петербург: КОРОНА-принт, 2007. 320 с.

10. Маслий А.С. Микропроцессорный вентильно-индукторный электропривод стрелочного перевода моношпального типа : дис. канд. техн. наук : 05.09.03 «Электротехнические системы и комплексы» / Харьков, 2014. 192 с.

11. Balaji M., Kamaraj V. Design of High Torque Density and Low Torque Ripple Switched Reluctance Machine using Genetic Algorithm. *European Journal of Scientific Research*. Vol.47, No.2 (2010). P.187-196.

12. Manesh Krishnamurthy, Chris S Edrington, Ali Emadi, Peyman Asadi, Mehrdad Fahimi, Babak Fahimi Making the Case for Application of Switched Reluctance Motor Technology in Automotive Product. *IEEE Transaction on Power Electronics*. May 2006. Vol. 21, No. 3. P. 659-675.

References (transliterated)

1. Krishnan R. Switched reluctance motor drives. Modeling. Simulation, Analysis, Design and Applications. CRC Press, 2001. 398 p.

2. Buriakovskiy S., Masliy A., Pasko O., Denys I. Research and development of an electric traction drive based on a switched reluctance motor. *Transport Problems*. 2018. № 13/2. P. 69-80.

3. Viorel I.A., Strete L., Husain I. An analytical model of switched reluctance motor based on magnetic field analysis results, *Proc. of 3rd Int. Symp. on Electrical Engineering and Energy Converters*. Romania. 2009. P. 97-100.

4. Martin MANA: Mathematical model switched reluctance motor. Dept. of Power Electrical and Electronic Engineering, 2010 P.25.

5. Golladzev U.A. Ventilno-inductornie dvigateli [Switched-reluctance motors], Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo central'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta «Electropribor», 2003. P. 147.

6. Rasmussen P. Omand Design and Advanced Control of Switched Reluctance Motors. Denmark: Aalborg University, 2002. 256 p.

7. David M. Finite Element Method Magnetics. User's Manual. 2004. Version 3.4 79 p.

8. Rimsha V.V. Modelirovanie i sintez reaktivnih i induktivnih electromechanicheskikh preobrazovatelei [Modeling and synthesis of reactive and inductive electromechanical converters]: dissertacia doktora tekhnicheskikh nauk, 05.09.01. Odessa, 2004. 320 p.

9. German-Galkin S.G. Computernoe modelirovanie poluprovodnikovih system [Computer simulation of semiconductor systems]. Sankt-Peterburg; Korona-print, 2007. 320 p.

10. Masliy A.S. Mikroprocesorniy ventilno-induktorniy elektropivod strelochnogo perevoda monoshpalnogo tipa [Microprocessor switched-reluctance electric switch of mono-sleeper type]: dissertacia, kandidat tekhnicheskikh nauk: 05.09.03 Elektricheskie sistemi i kompleksi. Kharkiv, 2014. 192 p.

11. Balaji M., Kamaraj V. Design of High Torque Density and Low Torque Ripple Switched Reluctance Machine using Genetic Algorithm. *European Journal of Scientific Research*. Vol.47 No.2 (2010). P. 187-196.

12. Manesh Krishnamurthy, Chris S Edrington, Ali Emadi, Peyman Asadi, Mehrdad Fahimi, Babak Fahimi Making the Case for Application of Switched Reluctance Motor Technology in Automotive Product. *IEEE Transaction on Power Electronics*. May 2006. Vol. 21, No. 3. P. 659-675.

Надійшло (received) 04.06.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Маслій Артем Сергійович (Маслий Артем Сергеевич, Masliy Artem Sergeevich) – кандидат технічних наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки; м. Харків, Україна; e-mail: a.masliy@ukr.net.

Карпенко Надія Петрівна (Карпенко Надежда Петровна, Karpenko Nadezhda Petrovna) – кандидат технічних наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки; м. Харків, Україна.

Туренко Олександр Геннадійович (Туренко Александр Геннадиевич, Turenko Alexandr Gennadievich) – студент Українського державного університету залізничного транспорту, кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки; м. Харків, Україна; e-mail: aleksandrturenko97@gmail.com

Сафронов Олег Едуардович (Сафронов Олег Эдуардович, Safronov Oleg Eduardovich) – студент Українського державного університету залізничного транспорту, кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки; м. Харків, Україна; e-mail: sfrnvolh@gmail.com

Головко Петро Анатолійович (Головко Петр Анатоліевич, Golovko Petr Anatolievich) – студент Українського державного університету залізничного транспорту, кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки; м. Харків, Україна.